服役飞机极端环境应力事故树分析方法

张亚娟,王彬文,吴敬涛,成竹,田培强

(中国飞机强度研究所,710065 西安)

摘　要:针对极端环境应力与飞机服役风险评估之间关系的复杂性和不确定性问题,采用事故树分析方法对服役飞机事故与极端环境应力相关性进行系统分析和探讨。首先基于极端环境应力导致飞机事故的相关数据库数据的统计分析,构建了飞机极端环境应力因素集及飞机极端环境应力事故树;然后根据极端环境应力作用机理分析及严酷度数学模型,计算极端环境应力导致飞机事故发生概率,评估极端环境应力直接相关严酷度,预测极端环境应力与飞机服役事故的关联度;最后总结形成了一种服役飞机极端环境应力事故分析方法。研究结果表明了积冰、雨、侧风、雾对服役飞机安全飞行影响极大,可为极端环境下飞机维保、签派及安全运营提供支持。

关键词:事故树;极端环境应力;事故概率分析;严酷度;关联度

中图分类号:V328　　**文献标志码:**A

Fault tree analysis method for extreme environmental stress of aircraft in service

ZHANG Yajuan, WANG Binwen, WU Jingtao, CHENG Zhu, TIAN Peiqiang

(Aircraft Strength Research Institute of China, 710065 Xi'an, China)

Abstract: Aiming at the complexity and uncertainty of the relationship between extreme environmental stress and aircraft service risk assessment. The fault tree analysis method is used to systematically analyze and discuss the correlation between aircraft accidents in service and extreme environmental stresses. Firstly, based on the statistical analysis of the database data related to aircraft accidents caused by extreme environmental stress, an aircraft extreme environmental stress factor set and an aircraft extreme environmental stress fault tree are constructed. Then, according to the analysis of the action mechanism of extreme environmental stress and the mathematical model of severity, the probability of aircraft accidents caused by extreme environmental stress is calculated, the severity of direct correlation of extreme environmental stress is evaluated, and the correlation between extreme environmental stress and aircraft service accidents is predicted. Finally, a method for analyzing extreme environmental stress accidents of aircraft in service is summarized. The research results show that icing, rain, crosswind, and fog have a great impact on the safe flight of service aircraft, which can provide support for aircraft maintenance, dispatch, and safe operation in extreme environments.

Key words: fault tree; extreme environmental stress; accident probability analysis; severity; relevancy

收稿日期:2022-12-07　　**修回日期:**2023-01-12

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 20200009023010)

通信作者:张亚娟,高级工程师。E-mail: zhang_yj623@126.com

引用格式:张亚娟,王彬文,吴敬涛,等. 服役飞机极端环境应力事故树分析方法[J]. 应用力学学报,2023,40(1):34-39.

ZHANG YaJuan, WANG Binwen, WU Jingtao, et al. Fault tree analysis method for extreme environmental stress of aircraft in service[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(1): 34-39.

研究发现高温、低温、湿热、雨、雪、雾、积冰、吹风、盐雾等极端环境应力[1]是引发服役飞机事故症候的主要因素。极端环境应力对服役飞机的作用机理一般表现在两个方面,一方面是简接诱发效应,即在复杂多变的极端环境应力作用下,会使飞机机体材料的物理或化学性质发生改变,从而引起结构变形,系统和机构性能降低,功能受限,影响飞机作战效能[2],比如由于飞机防护涂层老化引起的基体结构腐蚀问题[3],从美国沿海空军基地事故调查得知,由腐蚀老化引起的事故占73%;另一方面是直接相关效应,即极端环境应力可能直接导致飞机运行能力丧失,系统操作失灵,造成严重飞行事故,比如在极端环境应力作用下,飞机副翼轴冻结、动力系统(APU 和发动机)无法起动运行、起落架收放机构卡滞、液压系统漏油、环控系统调温失效等事故频发。

近几年随着人们对飞机环境适应性的日益重视,在环境应力分析方法方面开展了相关研究,苏月等[4]采用模糊因果模型研究了环境应力对故障模式的影响程度,提出了一种属性权重算法来计算环境应力特征与故障模式的定量关系。兰杰等[5]采用多参数拟合方法得到产品工作及贮存环境应力变化规律,提出了一种基于加速寿命试验数据的产品时变环境应力可靠性评估方法。王宏峰等[6]构建了层级分析数学模型,形成了环境应力筛选效果的系统评价技术。文献[7-8]给出了某型产品环境应力定量选取方案,形成了相应的环境应力挑选方法。刘喆等[9]对危险天气因素导致的航空飞行事故进行统计分析。文献[10-12]研究了太阳风环境应力分析方法及相应试验模拟技术。文献[13-15]研究了几种战场电磁环境应力分析方法,开展了电磁环境效应的评估计算。但是,关于极端环境应力与飞机事故评价之间的关联性研究未见相关报道。

同时,CCAR25. 1301(a)(4)、25. 1309(a)和25. 1323 等适航条款都对服役飞机在极端环境应力下安全运营能力提出了相关规定。本研究针对极端环境应力与飞机安全风险评估之间关系的复杂性和不确定性,采用布尔代数法构建了飞机极端环境应力数学集合,通过极端环境应力作用机理、极端环境应力导致飞机事故发生概率、极端环境应力直接相关严酷度的研究,形成了服役飞机极端环境应力事故树分析方法,明确极端环境应力及其特征与飞机事故的关联性,为极端环境下飞机维保、签派及安全服役提供支持。

1 飞机极端环境应力事故树构建

极端环境应力对飞机或操作人员的作用效果称为气候环境应力,采用事故树分析法(fault tree analysis,FTA)对飞机极端环境应力进行研究,探究影响飞机飞行安全的主要极端环境应力,并进行极端环境应力导致事故发生概率分析,预测极端环境应力引发服役飞机事故对飞行安全影响程度[16-18]。

分析和统计数据主要来源于美国国家运输安全委员会(NTSB)的航空事故和事件数据系统(AAIDS)和联邦航空管理局(FAA)的事故/事件数据系统(AIDS)。通过对相关数据统计分析获得与服役飞机事故相关性较大的极端环境应力作为事故树的底事件,如表 1 所示。

表 1 飞机极端环境应力事故树底事件

Tab. 1 Aircraft extreme environmental stress accident tree bottom events

号码	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
极端环境应力	高温	低温	湿热	积冰	雨	雪	雾	侧风	盐雾

利用布尔代数法[19-20]进行运算,即

$$T = G_1 \cdot G_2 \tag{1}$$

$$G_1 = X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 \tag{2}$$

$$G_2 = X_1 + X_2 + X_5 + X_6 + X_8 + X_9 \tag{3}$$

式中:T 是事故树的顶事件;G_1、G_2 分别是中间事件—极端环境应力作为直接相关原因和间接累积原因。获得导致顶事件“极端环境应力作用下导致的服役飞机事故”的最小割集有 2 组:$\{X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8\}$,$\{X_1, X_2, X_5, X_6, X_8, X_9\}$,包括 9 种导致顶事件发生的底事件,即事故诱因极端环境应力。

根据极端环境应力对飞机作用机理及环境效应,将导致顶事件发生的中间事件分为极端环境应力作为直接相关原因和间接累积原因两大类,由以上顶事件、中间事件及底事件构建事故树见图 1。

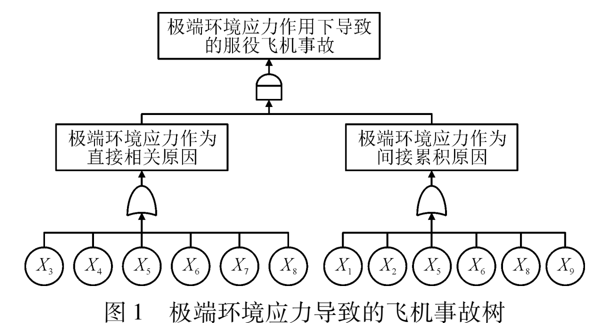


图 1 极端环境应力导致的飞机事故树

Fig. 1 Aircraft fault tree caused by extreme environmental stress

2 服役飞机事故与极端环境应力相关性分析

针对极端环境应力与飞机服役事故之间关系的复杂性和不确定性，基于极端环境应力引起飞机相关事故数据库的统计数据分析，采用极端环境应力严酷度来评估各个底事件对服役飞机运行安全的影响，建立极端环境应力严酷度数学模型如下。

$$R_i = f(P(X_i), C(X_i)) \tag{4}$$

式中：R_i 表示底事件严酷度[21]；$P(X_i)$ 表示极端环境应力导致飞机事故概率函数；$C(X_i)$ 表示极端环境应力导致飞机事故对飞机损坏严重程度。

2.1 极端环境应力作用机理分析

在本研究构建的飞机极端环境应力事故树中，X_1，X_2，X_3，…，X_9 是 9 个独立底事件，通过中间事件与顶事件密切相关，即底事件发生就有可能导致顶事件出现，因此顶事件的发生概率取值取决于 P_i 的值，即

$$P(X_i) = P(X_1, X_2, \cdots, X_n) \tag{5}$$

式中：X_i 及 P_i 的取值可以通过统计数据估算得到；$P(X_i)$ 为事故树的结构函数，又是以极端环境应力为自变量的布尔逻辑函数，其中与门函数为

$$P(X_i) = k\prod_{i=1}^{n} X_i \tag{6}$$

或门函数为

$$P(X_i) = k\prod_{i=1}^{n} X_i = k\left(1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - X_i)\right) \tag{7}$$

根据上述提及的相关数据库数据，1988—2018 年 30 年间，7 329 起因极端环境应力导致的飞行事故/事故症候，从中抽取相关典型案例进行分析：例如飞行事故编号 CHI04LA086 的案例中，飞机在着陆时遭遇强烈的侧风极端天气，飞机向左偏离开跑道最终导致飞机前起落架毁坏，左侧螺旋桨叶片解体；飞行事故编号 FTW03MA160 的案例中飞机降落时遭遇强降雨天气，飞行员视野受损，导致飞机偏离跑道前起落架损坏。

通过典型案例分析，探究极端环境应力类型与飞机事故发生之间的因果关系，并归类统计分析，简化分类方式，把服役飞机极端环境应力导致的飞行事故分为 2 类，即极端环境应力作为直接相关因素和间接累积因素，每种极端环境应力发生事故概率值如图 2 所示。

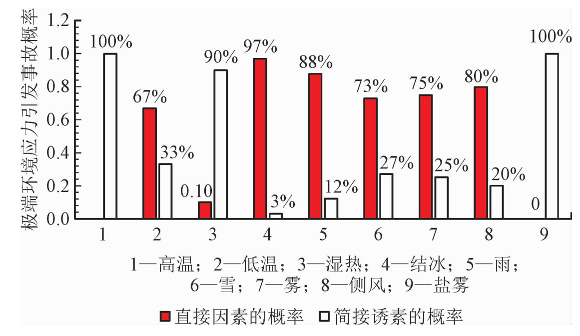


图 2 极端环境应力作为事故发生的直接相关因素和间接累积因素概率

Fig. 2 Probability of extreme environmental stress as a direct related factor and an indirect cumulative factor of accident occurrence

从图 2 可以看出，其中低温、积冰、雨、雪和侧风这些极端环境应力导致的大多数飞行事故中，这几类极端环境应力是事故发生的直接相关因素，飞机的损坏模式一般是机载设备或飞机系统产生破坏，导致严重的飞行事故。而由于高温、低温、雾、盐雾等极端环境应力导致的飞行事故中，这种极端环境应力对飞机的损坏模式具有间接累积效应，如果能够及时维保修理，这种飞行事故是有可能避免的。

2.2 极端环境应力导致飞机事故发生概率

梳理相关飞机事故数据库资料，挑选与极端环境应力相关的事故事件，研究在此类事故事件中飞机受损坏程度，把此类损坏定义为 4 种损坏：无明显损坏、轻微损坏、较严重损坏和严重损坏，进而构建极端环境应力引发飞机事故损坏程度函数，即

$$C = \{严重损坏, 较严重损坏, 轻微损坏, 无损坏\},$$

$$P(C_{i(\max)}) = k \cdot P(C_i) \tag{8}$$

式中：$P(C_{i(\max)})$ 为极端环境应力（底事件）引起服役飞机严重损坏事故的概率；k 为极端环境应力导致飞机严重损坏发生的概率值，根据统计数据得到 k 可取 11%；$P(C_i)$ 为极端环境应力（底事件）引起服役飞机发生不同程度损坏事故的概率。

研究结果显示，由极端环境应力导致的服役飞机事故中 98% 都造成了不同程度的损坏，这些事故中最常见（52% 概率）的损害程度为较严重损坏，其次是 35% 的轻微损坏和 11% 严重损坏。这些数据表明，如果极端环境应力导致服役飞机发生事故，将会对飞机造成非常严重的损坏。

为了评估极端环境应力对服役飞机的危害程度，通过统计计算得到这 9 种极端环境应力导致飞

机严重损坏事故的概率见图 3。

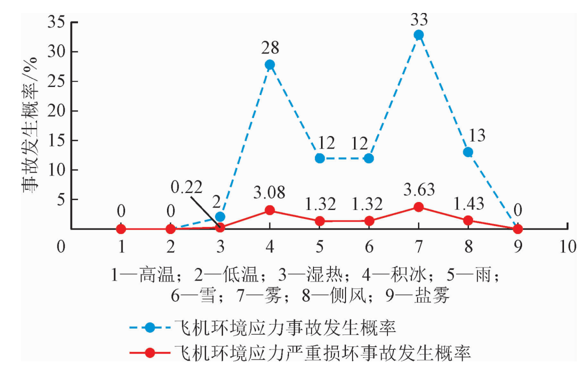


图 3 极端环境应力导致飞机事故概率和严重事故概率

Fig. 3 Aircraft accident probability and serious accident probability caused by extreme environmental stress

由图 3 可知，雾和积冰这 2 种极端环境应力对服役飞机危害较大，在飞机签派时要尽量避免。

2.3 极端环境应力直接相关严酷度评估

假设极端环境应力作为飞机飞行事故直接因素，产生破坏性事故时，认为极端环境应力对飞机飞行的严酷度为最大，因此可以定义极端环境应力的最大严酷度 $R_{i(\max)}$ 为其引发事故发生概率与引发严重损坏事故发生概率之和，即

$$R_{i(\max)} = P(X_i) + P(C_{i(\max)}) \qquad (9)$$

计算得到极端环境应力对飞机飞行最大严酷度值见图 4。

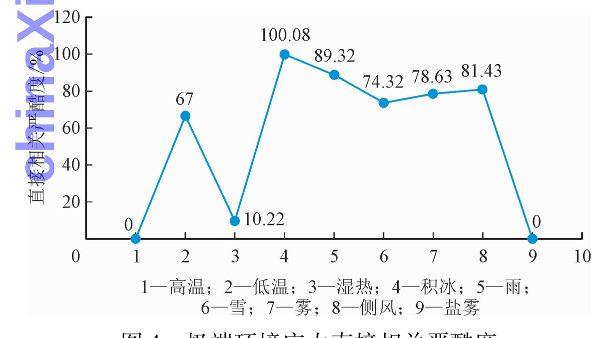


图 4 极端环境应力直接相关严酷度

Fig. 4 Direct related hazards of extreme environmental stress

由图 4 可知，这几类极端环境应力对服役飞机严酷度由高到低依次为：积冰、雨、侧风、雾、雪、低温、湿热、高温/盐雾。

2.4 极端环境应力引发飞机服役事故关联度预测

预测极端环境应力对引发飞机服役的事故关联度，由极端环境应力(底事件)发生概率，以及极端环境应力引发飞机飞行事故的概率来定义，即

$$\mathrm{IMP}_{X_i} = P(X_i) \times P(C_i) \times 100 \qquad (10)$$

式中：$P(X_i)$ 为极端环境应力作为直接相关因素发生概率；$P(C_i)$ 为极端环境应力引发发生不同程度损坏事故的概率；IMP_{X_i} 为事故关联度。

依据以上的研究结果，以及式(10)计算获得极端环境应力引发服役飞机事故关联度见图 5。

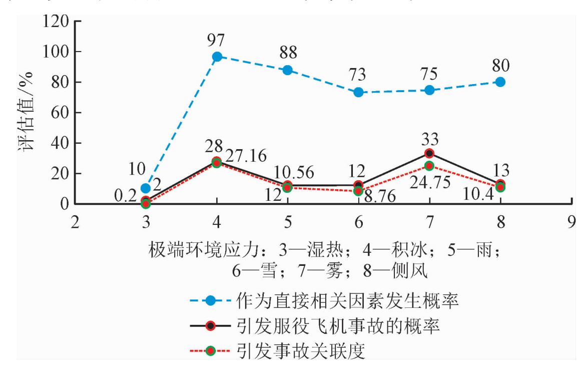


图 5 极端环境应力引发服役飞机事故关键度

Fig. 5 Criticality of service aircraft accidents caused by extreme environmental stress

由图 5 可知，极端环境应力引发飞机事故的关联度排序由高到底依次为：积冰(27.16)、雾(24.75)、雨(10.56)、侧风(10.4)、雪(8.76)、湿热(0.2)。

3 极端环境应力事故树分析方法

总结以上研究内容，本研究提出了一种服役飞机极端环境应力事故树分析方法，该方法主要分析步骤见图 6。

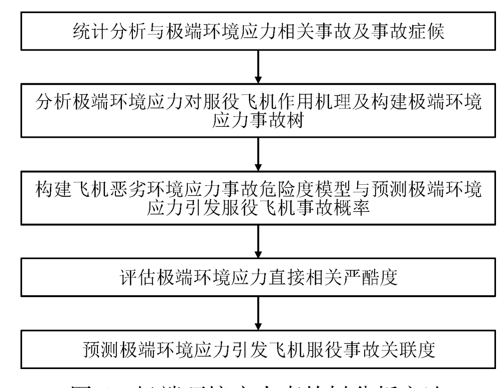


图 6 极端环境应力事故树分析方法

Fig. 6 Fault tree analysis method of extreme environmental stress

由图 6 可知，该方法基于极端环境应力引起飞行事故及事故症候统计数据，以极端环境应力引发服役飞机事故的机理分析为出发点，构建事故树及相关数学模型，明确服役飞机事故与极端环境应力之间的相关性，定量评价极端环境应力引发服役飞

机事故的严酷度，预测极端环境应力引发飞机服役事故关联度。可为飞机极端环境应力安全运营提供理论参考。

4 结 论

1）以飞机极端环境应力作用机理出发，得到导致飞机气候环境事故症候的中间事件有 2 个，底事件有 9 个，这些环境应力独立作用或相互结合都可能导致事故发生，同时由事故树也可以直观地看出中间事件与底事件之间的相互联系。

2）通过飞机极端环境事故树结构函数的构建，结合极端环境飞机事故统计数据，得到底事件导致中间事件的发生概率，定量表明极端环境应力引发服役飞机事故发生概率。

3）构建极端环境应力（底事件）引发飞机事故严酷度函数，计算得到底事件引发飞机飞行事故的发生概率 $P(X_i)$，以及极端环境应力对飞机飞行最大严酷度，定量评估了极端环境应力（底事件）导致飞机事故危害程度。

4）通过研究极端环境应力发生的概率，以及极端环境应力作为直接相关因素对飞机事故损坏程度分析，预测极端环境应力引发服役飞机事故关联度。

参考文献：

[1] 王浚，黄本诚，万才大，等. 环境模拟技术[M]. 北京：国防工业出版社，1996.

[2] HE Q C, CHEN W H, PAN J, et al. Improved step stress accelerated life testing method for electronic product[J]. Microelectronics reliability, 2012, 52(11): 2773-2780.

[3] 陈群志，康献海，刘健光，等. 军用飞机腐蚀防护与日历寿命研究[J]. 中国表面工程，2010，23(4)：1-6.
CHEN Qunzhi, KANG Xianhai, LIU Jianguang, et al. Discussion about military aircraft anti-corrosion and calendar life research[J]. China surface engineering, 2010, 23(4): 1-6(in Chinese).

[4] 苏月，景博，黄以锋，等. 基于模糊因果推理和多决策类粗糙集的环境-故障关联分析方法[J]. 仪表技术与传感器，2015(8)：100-103.
SU Yue, JING Bo, HUANG Yifeng, et al. Correlation analysis method between environment and failure based on fuzzy causality diagram and rough set of multiple decision classes[J]. Instrument technique and sensor, 2015(8): 100-103(in Chinese).

[5] 兰杰，袁宏杰，袁铭，等. 考虑真实时变环境应力的系统可靠性评估[J]. 北京航空航天大学学报，2018，44(2)：406-412.
LAN Jie, YUAN Hongjie, YUAN Ming, et al. System reliability assessment under real time-varying environmental stress[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(2): 406-412(in Chinese).

[6] 王宏峰，熊益群，郁晓东，等. 武器装备环境应力筛选实施效果评价研究[J]. 新技术新工艺，2015(3)：165-167.
WANG Hongfeng, XIONG Yiqun, YU Xiaodong, et al. Research on environmental stress screening evaluation methods of electronic components of ordance equipments[J]. New technology & new process, 2015(3): 165-167(in Chinese).

[7] 邢钉凡，赵帮绪，罗凡. 定量环境应力筛选的应用探讨[J]. 四川兵工学报，2011，32(5)：142-145.
XING Dingfan, ZHAO Bangxu, LUO Fan. Application of quantitative environmental stress screening[J]. Journal of Sichuan ordnance, 2011, 32(5): 142-145(in Chinese).

[8] CU J F, TANG X J. Meta-synthesis is approach to complex system modeling[J]. European journal of operational research, 2004, 166: 597-601.

[9] 刘喆，白洁，张文军. 危险天气导致航空飞行事故的统计分析[J]. 中国民航飞行学院学报，2022，33(1)：23-27.
LIU Zhe, BAI Jie, ZHANG Wenjun. Statistical analysis of aviation flight accidents caused by dangerous weather[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2022, 33(1): 23-27(in Chinese).

[10] 刘宇明，郑慧奇，丁义刚，等. 月面太阳风环境效应及试验技术[J]. 装备环境工程，2013，10(6)：82-87.
LIU Yuming, ZHENG Huiqi, DING Yigang, et al. Environmental effects and simulation test techniques of solar wind on moon[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(6): 82-87(in Chinese).

[11] RICHARDSON J D, WANG C, PAULARENA K I. The solar wind: from solar minimum to solar maximum[J]. Advances in space research, 2001, 27(3): 471-479.

[12] PINES V, ZLATKOWSKI M, CHAIT A. Interactions of solar wind plasma with dust grains: effects of strong plasma anisotropy[J]. Advances in space research, 2009, 43(1): 152-163.

[13] 覃宇建，王为，周东明，等. 基于 TDIE-FDTD 混合算法的电磁环境效应分析[J]. 现代电子技术，2013，36(21)：157-162.
QIN Yujian, WANG Wei, ZHOU Dongming, et al. Analysis of electromagnetic environment effect based on TDIE-FDTD hybrid algorithm[J]. Modern electronics technique, 2013, 36(21): 157-162(in Chinese).

[14] 刘尚合. 武器装备的电磁环境效应及其发展趋势[J]. 装备指挥技术学院学报，2005，16(1)：1-6.
LIU Shanghe. Effect of electromagnetic environment to weaponry

and its trend of development[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology,2005,16(1):1-6(in Chinese).

[15] 徐金华,刘光斌. 基于灰色层次分析法的战场电磁环境效应评估[J]. 电光与控制,2010,17(4):14-16.
XU Jinhua,LIU Guangbin. Evaluation of battlefield electromagnetic environment effect based on grey analytical hierarchy process[J]. Electronics optics & control,2010,17(4):14-16(in Chinese).

[16] SUR I H. A critique of contemporary methods of research synthesis[J]. Post script,2000(1):49-55.

[17] GU J F,TANG X J. Meta-synthesis approach to complex system modeling[J]. European journal of operational research,2005,166(3):597-614.

[18] 刘峰,叶义成,黄勇. 系统安全评价方法的研究现状及发展前景[J]. 中国水运,2007,7(1):179-181.
LIU Feng,YE Yicheng,HUANG Yong. Current and development foreground of safety evaluation methods research[J]. China water transport,2007,7(1):179-181(in Chinese).

[19] 段汕,罗敬,徐文,等. 布尔函数与形态算子关系的研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2013,32(2):106-110.
DUAN Shan,LUO Jing,XU Wen,et al. On the relationship between Boolean function and morphology operator[J]. Journal of South-Central University for Nationalities(natural science edition),2013,32(2):106-110(in Chinese).

[20] 张亚娟,吴敬涛,邓文亮,等. 飞机气候环境实验室高温试验系统可靠性研究[J]. 环境技术,2021,39(4):90-94.
ZHANG Yajuan,WU Jingtao,DENG Wenliang,et al. Research on reliability of laboratory high temperature test system based on fault tree analysis[J]. Environmental technology,2021,39(4):90-94(in Chinese).

[21] 王赟,齐乐,温国谊. 基于模糊风险评价的战伤飞机再次出动决策可用度模型[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(9):74-82.
WANG Yun,QI Le,WEN Guoyi. Availability model of war-wounded aircraft re-dispatch decision-making based on fuzzy risk assessment[J]. Journal of ordnance equipment engineering,2022,43(9):74-82(in Chinese).

(编辑 黄崇亚 李坤璐)

